HAL open science

Controladores borrosos para la dirección de vehículos autónomos en maniobras dentro de entornos urbanos

Joshué Pérez Rastelli, Teresa de Pedro, Matilde Santos

To cite this version:

Joshué Pérez Rastelli, Teresa de Pedro, Matilde Santos. Controladores borrosos para la dirección de vehículos autónomos en maniobras dentro de entornos urbanos. XVI Congreso Español sobre Tecnologías y Lógica Fuzzy, Feb 2012, Valladolid, España. hal-00732938

HAL Id: hal-00732938

https://inria.hal.science/hal-00732938

Submitted on 1 Oct 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Controladores borrosos para la dirección de vehículos autónomos en maniobras dentro de entornos urbanos

Joshué Pérez Rastelli[1], **Teresa de Pedro Lucio**[1], **Matilde Santos Peñas**[2]

[1]*Centro de Automática y Robótica, UPM-CSIC, Arganda del Rey, Madrid, España*, {joshue.perez,teresa.pedro}@csic.es
[2]*Departamento de arquitectura de computadores y automática, Facultad de Informatica, Universidad Complutense de Madrid, España*, msantos@dacya.ucm.es

Resumen

Hasta la fecha, los sistemas de ayuda a la conducción desarrollados en el sector de la automoción se centran especialmente en el control de velocidad del vehículo. Sin embargo, sistemas que involucren el control (ya sea parcial o total) sobre la dirección del vehículo se encuentran todavía en fase experimental. Este trabajo está centrado en el diseño, desarrollo e implementación de un sistema de control lateral en cascada para vehículos autónomos reales, basado en controladores borrosos de alto nivel para maniobras en circuitos urbanos. Diferentes experimentos se han llevado a cabo en curvas de distinto radio y a diferentes velocidades (dentro de entornos urbanos), además, se han implementado dos nuevas maniobras: la marcha atrás y conducción en rotondas, mostrando un buen funcionamiento.

Palabras Clave: Control lateral, logica difusa, entornos urbanos, vehículos autónomos, control inteligente.

1 Introducción

Las investigaciones realizadas en los Sistemas de Trasporte Inteligente - ITS - (del ingles, *Intelligent Transportation Systems*) están encaminadas a la mejora de la seguridad y el confort en la conducción de vehículos. Diferentes maniobras han sido desarrolladas e implementadas en vehículos comerciales, entre ellas: el control de crucero (CC) [1] y el control de crucero adaptativo, sistemas de frenado ABS [2], sistemas que actúan de forma autónoma sobre el vehículo [3], sistemas de aviso de ángulo muerto [4], etc. La mayoría de estas aplicaciones están enfocadas al control longitudinal (acción sobre el freno y el acelerador), aunque algunas, a muy baja velocidad, toman el control del volante como: el aparcamiento asistido [5], y los sistemas de dirección asistida (EPS o EPAS) [6], los cuales solo toman el control parcial del volante para avisar al conductor sobre situaciones de peligro.

La escasa implantación comercial del control lateral se debe, en parte, a las fatales consecuencias que implican cambios bruscos en el volante (a veces giros de pocos grados pueden hacer que el vehículo vuelque), dejando al conductor sin tiempo para reaccionar y recuperar el control del volante. Por ello, la implementación de un sistema capaz de controlar de forma precisa el volante se antoja fundamental para el desarrollo de los vehículos autónomos. Este sistema no puede limitarse solo al control de giro del volante [7, 8], también es necesario un giro suave y seguro, y para ello hay que considerar la velocidad angular del volante como parámetro de control. En este sentido, en el presente trabajo se presenta una arquitectura de control que utiliza dos variables, la posición y la velocidad angular del volante en el lazo de control que gobierna la dirección del vehículo.

Por otra parte, sabemos que los controladores borrosos tienen la ventaja de utilizar el conocimiento de expertos y esto, permite una intuitiva y rápida sintonía para diferentes maniobras. En este sentido, se ha incluido de la velocidad giro del volante como parámetro de control, así como variables que, hasta ahora solo, estaban relacionadas con el control longitudinal, mejorando la conducción tanto en tramos rectos como en tramos curvos.

Muchos grupos de investigación sólo han considerado la posición del volante como único parámetro de control, sin tomar en cuenta la velocidad del vehículo. Aunque los resultados de este tipo de control son aceptables, en muchos casos, el volante oscila, sobre todo en tramos curvos. El objetivo de la arquitectura presentada en este trabajo es incluir la velocidad del vehículo y la distancia a la próxima curva como nuevas variables de entrada al sistema, manteniendo además la simplicidad de la estructura general del sistema. Los experimentos que se han llevado a cabo permiten demostrar la arquitectura de control planteada se puede aplicar a nuevas maniobras que, hasta ahora, no habían sido consideradas: la marcha atrás en calles ciegas y la conducción en rotondas.

La estructura de este artículo se divide como sigue: la sección 2 describe los trabajos previos, así como las principales aportaciones. La sección 3 describe el vehículo y las pistas de pruebas del CAR. Los controladores borrosos utilizados en los diferentes experimentos, se explican en la sección 4. Con el objetivo de validar los diferentes controladores, enmarcados dentro de la misma arquitectura de control, se han realizados experimentos con un vehículo real (sección 5). Finalmente, se remarcan las conclusiones más importantes, así como los trabajos futuros.

2 Trabajos previos

En el mundo del control existe una brecha entre el control de sistemas dinámicos simulados y la implementación de este control en sistemas reales. El control inteligente es una buena alternativa para la automatización de sistemas complejos, en este caso, vehículos de serie.

Sugeno y Nishida [9] han utilizado lógica borrosa para el control de robots móviles. En [10] se presentan los fundamentos para sintonizar estos controladores. Por lo tanto, el problema queda reducido a establecer un conjunto de reglas de control y sintonizarlas en función de la experiencia humana.

Los experimentos descritos en este trabajo han sido realizados en una furgoneta eléctrica del programa AUTOPÍA, en la que se ha implementado un nuevo sistema de control para la dirección en vehículos autónomos. Aunque el trabajo es la continuación de otras anteriores, [11, 8], las mejoras conseguidas son considerables. Estas se mencionan a continuación:

- El sistema de control propuesto introduce la velocidad angular como parámetro de control que no había sido considerado en trabajos previos [8], con el objetivo de mejorar la suavidad y el confort del control.
- De acuerdo con la experiencia de los conductores humanos, dos nuevos parámetros de control han sido tenidos en cuenta, v.g., la velocidad actual y distancia a la próxima curva. De esta forma, el sistema es *multivariable* - MIMO - (del ingles, *Multiple Input Multiple Output*) e introduce, variables asociadas tradicionalmente al control longitudinal en el control lateral.
- La velocidad para curvas próximas a los 90º estaba fijada a 8 km/h [11, 8]. El sistema propuesto no limita la velocidad para ajustar la trayectoria al carril de circulación. De hecho, las curvas de más 90º han podido ser tomadas hasta los 24 km/h.
- Finalmente, otros escenarios como caminos bloqueados y rotondas ha sido considerando dentro del esquema de control. Éstos solo requieren un ajuste de las reglas o de las funciones de pertenencia asociadas a cada maniobra, manteniendo la intuición y simplicidad en el ajuste de los controladores.

3 Descripción del sistema

El vehículo utilizado para validar el sistema de control propuesto en este trabajo es una furgoneta eléctrica del programa AUTOPIA, del Centro de Automática y Robótica (UPM-CSIC). La figura 1 representa el esquema de control, también se especifican los periféricos utilizados en la percepción del entorno. Como puede apreciarse el control longitudinal está separado del lateral. El control longitudinal se presupone solucionado [12].

Teniendo en cuenta que el objetivo de este trabajo es mejorar el control del volante en todo tipo de trazados, se ha utilizado el control de velocidad previamente desarrollado [8]. Para controlar el acelerador se ha utilizado una tarjeta analógica [8], y para el control del freno se ha instalado una bomba hidráulica [13]. La arquitectura de control ha sido adaptada, permitiendo la inclusión de nuevos sensores [14], como RFIDs, IMU, sensores de efecto Hall (para el cálculo de la velocidad), entre otros, de forma fiable y sencilla [12]. Sin embargo, y para las aplicaciones presentadas en este trabajo, solo se hará uso del sistema de posicionamiento (GPS + IMU), y del sensor de velocidad.

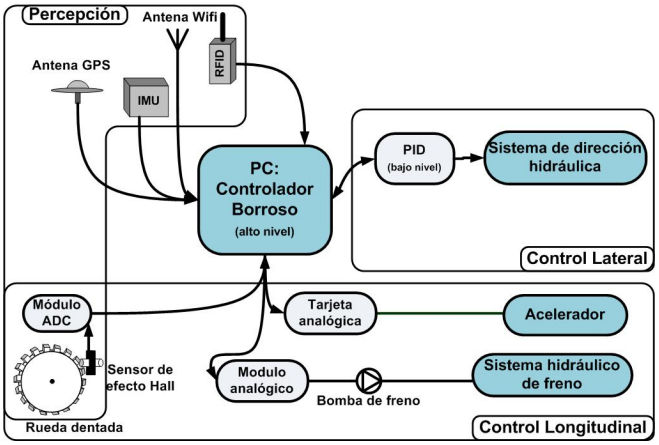

Figura 1: Esquema de control del vehículo

La figura 2 se muestra las pistas de pruebas utilizadas en los experimentos de este trabajo, en las instalaciones del CAR en Arganda del Rey, Madrid. La imagen superior muestra el trazado original de pistas, y la inferior la rotonda construida recientemente, con un radio de 13 metros y dos carriles internos.

Figura 2: Pistas de pruebas: trazado original y rotonda

4 Controladores borrosos para entornos urbanos

Para el control lateral del vehículo se ha utilizado una arquitectura en cascada. El lazo externo de control es un controlador borroso que emula al conductor humano y cierra el bucle de control con la señal proveniente del GPS y la del sensor de velocidad dispuesto [12]. El lazo interno de control es un PID discreto, el cual recibe la consigna desde el controlador borroso y lleva al volante hasta ella lo más rápida y suavemente posible.

Para el control lateral del vehículo se ha utilizado una arquitectura en cascada. El lazo interno de control está gobernado por un PID discreto[15]. El lazo externo de control es un controlador borroso que emula al conductor humano y cierra el bucle de control con la señal proveniente del GPS y del sensor de velocidad dispuesto para ello (figura 1).

Es sabido que la ventaja de los controladores borrosos radica en la facilidad para introducir la información y la experiencia humana del control de algunos procesos [10]. En este trabajo realizamos el control de tres maniobras en escenarios urbanos. Este control permiten demostrar lo intuitivo que son los controladores borrosos para una de las tareas más comunes y cotidianas de nuestros días: conducir un vehículo.

4.1 Controlador para curvas a diferentes velocidades

El control de alto nivel (figura 1) es controlador borroso. El ciclo de control lo cierran los datos provenientes del GPS y la velocidad leída directamente desde un sensor situado en una rueda delantera. Este controlador envía el ángulo del volante, junto con la velocidad de giro a la que el control de bajo nivel debe mover el motor solidario con el volante. Para la implementación del controlador borroso se ha utilizado la librería ORBEX, desarrollada por el grupo AUTOPÍA en sus comienzos [11].

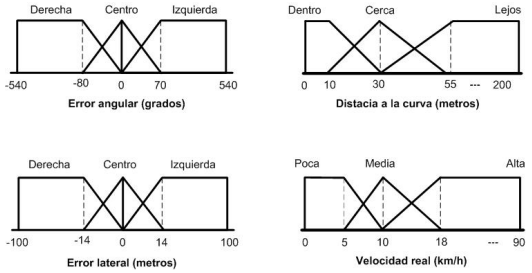

Figura 3: Funciones de pertenencia para el control del volante en rectas y curvas

El bucle de control tiene una frecuencia de 5 Hz. Como se verá en los resultados, esta frecuencia es suficiente para el buen desempeño del sistema. Las cuatro variables de entrada del controlador borroso se definen a continuación:

- ***error angular***: Ángulo entre la dirección del vehículo y la trayectoria predefinida, medido en grados.
- ***error lateral***: Distancia en metros desde la proyección en el suelo del morro del vehículo y la trayectoria predefinida.
- ***distancia a la curva***: Distancia del vehículo al centro de la próxima curva, esto es, el punto de intersección entre dos rectos consecutivos. Se estima utilizando la posición real del vehículo y el mapa de la trayectoria.
- ***velocidad real***: Velocidad del vehículo, calculada con el sensor de efecto hall, medida en kilómetros por hora (km/h).

Las reglas utilizadas para el control de posición del volante son:

SI *Error lateral* Izq. ENTONCES *Posición volante* Der.

SI *Error lateral* Ctr. ENTONCES *Posición volante* Mant.

SI *Error lateral* Der. ENTONCES *Posición volante* Izq.

SI *Error angular* Izq. ENTONCES *Posición volante* Der.

SI *Error angular* Ctr. ENTONCES *Posición volante* Mant.

SI *Error angular* Der. ENTONCES *Posición volante* Izq.

A continuación se presenta la base de reglas para controlar la velocidad angular. En un principio se habían utilizado 5 etiquetas para las funciones de pertenencia asociadas a la distancia a la próxima curva. Pero, debido a la simétrica con respecto al centro de la curva, se ha presentado solo los valores positivos de la de ésta, tal como se mencionó en la figura 3:

SI *Dist. a la curva* Dentro Y *Vel. real* Poca ENTONCES *Vel. angular* Media

SI *Dist. a la curva* Dentro Y *Vel. real* Media ENTONCES *Vel. angular* Media-Alta

SI *Dist. a la curva* Dentro Y *Vel. real* Alta ENTONCES *Vel. angular* Alta

SI *Dist. a la curva* Cerca Y *Vel. real* Poca ENTONCES *Vel. angular* Media

SI *Dist. a la curva* Cerca Y *Vel. real* Media ENTONCES *Vel. angular* Media-Alta

SI *Dist. a la curva* Cerca Y *Vel. real* Alta ENTONCES *Vel. angular* Media-Alta

SI *Dist. a la curva* Lejos Y *Vel. real* Poca ENTONCES *Vel. angular* Media

SI *Dist. a la curva* Lejos Y *Vel. real* Media ENTONCES *Vel. angular* Media

SI *Dist. a la curva* Lejos Y *Vel. real* Alta ENTONCES *Vel. angular* Poca

La fusión de ambos conjuntos de reglas en un mismo controlador permite que el volante gire suavemente, en función de las condiciones del entorno.

Los valores de salida del controlador son: Izquierda (-1) Mantener (0) y Derecha (+1) para el controlador de posición, y los valores Poca (0.4), Media (0.6), Media-Alta (0.8) y Alta (1) para el controlador de velocidad angular.

4.2 Controlador para la marcha atrás

Para el movimiento en marcha atrás se ha implementado el mismo esquema de control presentado en el figura 1. Incluso han sido utilizadas las mismas funciones de pertenencia, adaptadas a la cinemática del vehículo en marcha atrás. Solo se han cambiado, cuatro de las seis reglas de control de la posición del volante, sustituyéndolas por reglas duales como sigue:

SI *Error lateral* Izq. ENTONCES *Posición volante* Izq.

SI *Error lateral* Der. ENTONCES *Posición volante* Der.

SI *Error angular* Izq. ENTONCES *Posición volante* Izq.

SI *Error angular* Der. ENTONCES *Posición volante* Der.

4.3 Controlador para conducción en rotondas

Tomando como base la generación de trayectoria con curvas paramétricas propuesto en [16], se ha ajustado un nuevo

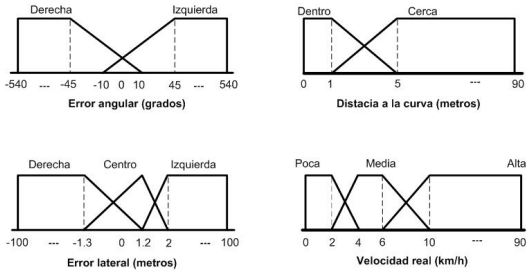

Figura 4: Funciones de pertenencia para el control del volante en rotondas

conjunto de reglas y funciones de pertenencia para la conducción autónomas en rotondas. En la figura 4 se muestran las funciones de pertenencia de este nuevo controlador.

En el conjunto de reglas es análogo al presentado en el apartado de conducción en curvas y rectas. Si bien la *distancia a la curva* ha sido reducida a dos funciones de entrada, esto se debe a que el efecto sobre el controlador se reduce debido la generación de puntos en la trayectoria de la rotonda [16]. Sin embargo, su efecto se aprecia cuando se realizan los cambios de carril dentro de la misma, esto es cuando se utiliza la etiqueta *Cerca*.

5 Experimentos

Los experimentos se han realizado en las instalaciones del CAR (UPM-CSIC). En todos se asume una velocidad crucero constante, aunque su valor puede ser cambiado en cada experimento.

5.1 Curvas a diferentes velocidades

En la figura 5 se muestran los experimentos con diferentes curvas y velocidades, desde los 8 km/h hasta los 24 km/h. Debido a la inclusión de la velocidad angular en el esquema de control se ha mejorado considerablemente el control en este tipo de escenarios.

En el experimento a 12 km/h se observa una pérdida en la corrección diferencial de la señal del GPS, por lo tanto un fallo en sistema de posicionamiento. No es parte de este trabajo dar una solución a este problema, que ya ha sido abordado en trabajos previos [17], y que actualmente se encuentra comercializado en sistemas de posicionamiento modernos. Sin embargo, la robustez del controlador borroso en cascada es capaz de filtrar ésta señal, debido a la acción sobre la velocidad angular, evitando saltos repentinos en la dirección, y manteniendo al vehículo en el camino.

5.2 Marcha atrás

En la figura 6 se muestra el comportamiento del vehículo circulando marcha atrás. Para realizar los cambios de mar-

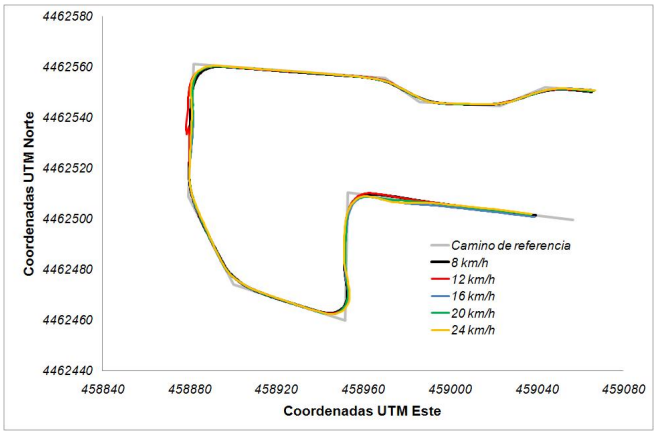

Figura 5: Curvas a diferentes velocidades

cha de forma autónoma, se ha habilitado una de las salidas analógicas del modulo ADC (figura 1), ya que la palanca de cambios en los vehículos eléctricos funciona como una resistencia (o *trimer*), lo que permite que solo con cambios del voltaje, se realicen los cambios de marcha desde el programa de control.

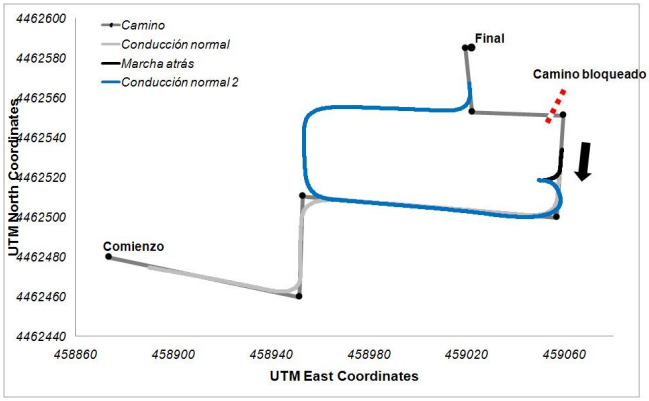

Figura 6: Secuencia de maniobra para la marcha atrás

Cuando el vehículo e n circulación recibe desde la estación central una señal indicando que el camino está bloqueado ([14]), el vehículo se detiene, define una nueva trayectoria y va marcha atrás hasta que encuentra un lugar para girar, vuelve a activar el controlador de marcha hacia a adelante.

5.3 Conducción en rotondas

En el último experimento el vehículo entra y sale de la rotonda, se muestra en la figura 7. En estos experimentos se asume que el vehículo viene por un camino recto, hasta que detecta una rotonda. Las rotondas pueden definirse como intersecciones que tienen un radio y centro definidos [16]. Con estos datos pueden generarse, en cada ciclo de control, la trayectoria a la que debe circular el vehículo, utilizando las ecuaciones paramétricas de una circunferencia [16].

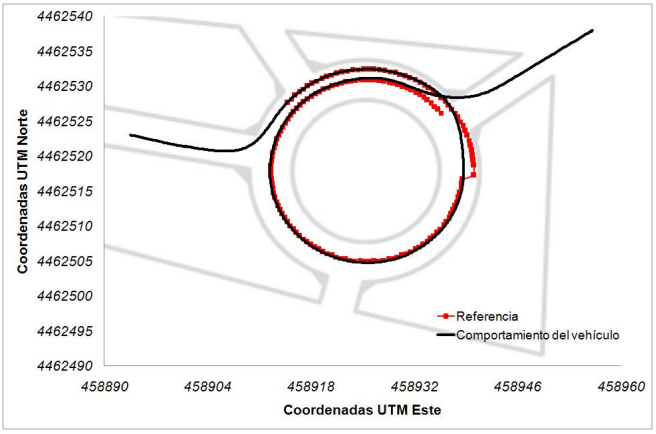

Figura 7: Maniobras en rotondas: entrada, cambio de carril y salida

Los puntos en rojo dibujados en la figura 7 muestran el mapa generado, mientras la gráfica negra representa la trayectoria del vehículo. Al entrar en la rotonda el vehículo circula en sentido anti horario y va por el carril central. En la primera vuelta intenta salir por la segunda salida, pero está congestionada [18]). Por eso el sistema de control decide dar otra vuelta, y cuando la salida queda libre, realiza un cambio de carril y sale de la rotonda.

6 Conclusiones y trabajos futuros

El sistema de control lateral basado en lógica borrosa propuesto en este trabajo, presenta buenos resultados en cada de uno de los tres escenarios urbanos que se han considerado: curvas, caminos bloqueados (marcha atrás) y rotondas.

El esquema de control que se presenta es muy intuitivo para el diseño de controladores borrosos. La sintonización y ajustes de los mismos se basan en las condiciones del vehículo y la experiencia de conductores expertos. La inclusión de una nueva variable de control, -la velocidad angular - asociada al comportamiento longitudinal del vehículo, permite que el movimiento del volante se asemeje más al de que haría un conductor humano.

Las pruebas en curvas de diferentes radios y a diferentes velocidades mejoran notablemente el estado de la técnica. Además, las maniobras de la marcha atrás y en la rotonda abren la posibilidad de considerar nuevos escenarios que resultan difíciles para algunos conductores.

Como parte de los trabajos futuros, se pretende desarrollar otras técnicas de control, considerando redes neuronales u otros algoritmos inteligentes que permitan ajustar mejor los controladores laterales, así como se ha hecho en trabajos previos [19]. Además, se presente incluir el control longitudinal dentro del esquema general de control, así como

considerar otros escenarios con otros vehículos, en las rotondas.

Agradecimientos

Este trabajo fue desarrollado gracias al apoyo del Plan Nacional, España, bajo el proyecto Tránsito (TRA2008-06602- C03-01), por la Comisión Interministerial de Ciencia y tecnología, España, bajo el Proyecto GUIADE (Ministerio de Fomento T9/08), y la financiación del proyecto CICYT DPI2009-14552-C02-01.

Referencias

[1] B. van Arem, C. J. G. van Driel, and R. Visser, "The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics," vol. 7, no. 4, pp. 429–436, 2006.

[2] J.-S. Lin and W.-E. Ting, "Nonlinear control design of anti-lock braking systems with assistance of active suspension," *IET Control Theory & Applications*, vol. 1, no. 1, pp. 343–348, 2007.

[3] T. hua Hsu, J.-F. Liu, P.-N. Yu, W.-S. Lee, and J.-S. Hsu, "Development of an automatic parking system for vehicle," in *Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conf. VPPC '08*, 2008, pp. 1–6.

[4] R. OMalley, M. Glavin, and E. Jones, "Vision-based detection and tracking of vehicles to the rear with perspective correction in low-light conditions," *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 5, no. 1, pp. 1–10, 2011.

[5] I. Totzke, S. Jessberger, D. Muhlbacher, and H.-P. Kruger, "Semi-autonomous advanced parking assistants: Do they really have to be learned if steering is automated?" *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 5, no. 2, pp. 141–147, 2011.

[6] J. Yoon, W. Cho, B. Koo, and K. Yi, "Unified chassis control for rollover prevention and lateral stability," vol. 58, no. 2, pp. 596–609, 2009.

[7] Y. Hayakawa, R. White, T. Kimura, and G. Naito, "Driver-compatible steering system for wide speed-range path following," vol. 9, no. 3, pp. 544–552, 2004.

[8] J. E. Naranjo, C. Gonzalez, R. Garcia, T. de Pedro, and R. E. Haber, "Power-steering control architecture for automatic driving," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 6, no. 4, pp. 406–415, 2005.

[9] M. Sugeno and M. Nishida, "Fuzzy control of model car," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 16, pp. 103–113, 1985.

[10] L. Zadeh, "Fuzzy sets," *Information and Control*, vol. 8, pp. 338–353, 1965.

[11] R. García, T. de Pedro, and A. Roselli, "Estrategias borrosas para pilotos automáticas," in *3 Jornadas Iberoamericanas de Automáticas, Cartagena de Indias, Colombia.*, 1997.

[12] J. Pérez, F. Seco, V. Milanés, A. Jiménez, J. Díaz, and T. de Pedro, "An rfid-based intelligent vehicle speed controller using active traffic signals," *Sensors*, vol. 10, no. 6, pp. 5872–5887, 2010.

[13] V. Milanés, C. González, J. Naranjo, E. Onieva, and T. de Pedro, "Electro-hydraulic braking system for autonomous vehicles," *International Journal of Automotive Technology*, vol. 11, no. 1, pp. 89–95, Feb. 2010.

[14] J. Pérez, C. Gonzalez, V. Milanes, E. Onieva, J. Godoy, and T. de Pedro, "Modularity, adaptability and evolution in the autopia architecture for control of autonomous vehicles," in *Proc. IEEE International Conference on Mechatronics ICM 2009*, 14–17 April 2009, pp. 1–5.

[15] V. Milanés, J. Pérez, E. Onieva, C. González, and T. de Pedro, "Lateral power controller for unmanned vehicles," *Electrical Review*, vol. 86, no. 1, pp. 207–211, Jan. 2010.

[16] J. Pérez, V. Milanes, T. de Pedro, and V. L., "Autonomous driving manoeuvres in urban road traffic environment: a study on roundabouts," in *18th World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC), Milán-Italia*, 14–17 April 2011, pp. 1–5.

[17] V. Milanés, J. Naranjo, C. Gonzalez, J. Alonso, and T. de Pedro, "Autonomous vehicle based in cooperative gps and inertial systems," *Robotica*, vol. 26, no. 5, pp. 627–633, Sept. 2008.

[18] J. Pérez, J. Villagra, E. Onieva, V. Milanes, T. de Pedro, and L. Vlacic., "Driving by driverless vehicles in urban environment," in *Computer Aided Systems Theory - EUROCAST 2011*, ser. Lecture Notes in Computer Science, S. B. . Heidelberg, Ed. Springer LNCS, 2011, vol. 4739/2007, pp. 1151–1158.

[19] J. Pérez, A. Gajate, V. Milanes, E. Onieva, and M. Santos, "Design and implementation of a neuro-fuzzy system for longitudinal control of autonomous vehicles," in *Proc. IEEE World Congress on Computational Intelligence WCCI 2010*, 14–17 April 2010, pp. 1–5.